

## O regulacji temperatury ciała

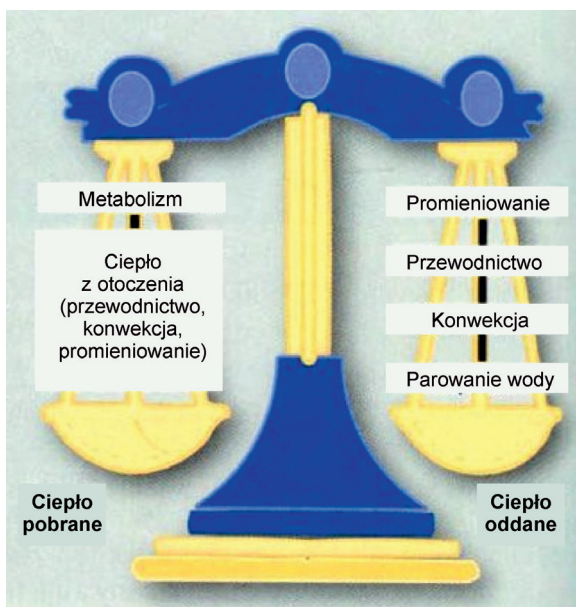
Człowiek, podobnie jak wszystkie ssaki i ptaki, należy do istot stałocieplnych. Oznacza to, że bez względu na temperaturę zewnętrzną wewnątrz ciała utrzymywane jest w stałej temperaturze.

Procesy biologiczne bardzo silnie zależą od temperatury, w której zachodzą. Temperatura wpływa m.in. na szybkość reakcji chemicznych oraz transportu cząsteczek, własności błony komórkowej oraz strukturę niektórych molekuł, dlatego utrzymanie temperatury na mniej więcej stałym poziomie jest bardzo istotne dla prawidłowego funkcjonowania ludzkiego ciała.

Temperatura wnętrza ciała zdrowego człowieka wynosi około  $37^{\circ}\text{C}$ . W ciągu doby waha się ona w niewielkim zakresie, ale zmiany te nie przekraczają  $1^{\circ}\text{C}$ . Duże odchylenia od optymalnej temperatury są niebezpieczne. Jeśli wewnątrz ciała osiągnie temperaturę powyżej  $45^{\circ}\text{C}$ , dochodzi do nieodwracalnych uszkodzeń, kończących się śmiercią. Natomiast spadek temperatury wnętrza ciała do  $28^{\circ}\text{C}$  powoduje zatrzymanie akcji serca. Dlatego organizmy stałocieplne wyposażone są w system regulujący temperaturę, który zapobiega zbyt niemu przegrzaniu lub wychłodzeniu.

### Równowaga cieplna

Utrzymanie stałej temperatury wiąże się z zapewnieniem równowagi pomiędzy ilością ciepła uzyskiwanego przez organizm i oddawanego przez niego do otoczenia (rys. 1).



Rys. 1. Aby utrzymać stałą temperaturę ciała organizm musi utrzymywać równowagę pomiędzy ciepłem uzyskiwanym w procesach metabolicznych i pobieranym z otoczenia a energią cieplną traconą poprzez promieniowanie, przewodnictwo, konwekcję i parowanie wody

Ciało uzyskuje konieczną do funkcjonowania energię w procesach przetwarzania pożywienia. Dzięki reakcjom rozkładu wysokoenergetycznych cząsteczek w komórkach wytwarzana jest energia potrzebna do pracy wszystkich mięśni, w tym m.in. do pracy serca. Jednak tylko niewielka część energii uzyskiwanej w procesach metabolicznych (maksymalnie 25%) jest wykorzystywana do pracy mięśni. Reszta energii zamieniana jest na ciepło. Organizm może też pobierać energię ciepłą z otoczenia, na przykład wystawiając się na działanie promieni słonecznych. Aby zapobiec zbytniemu wzrostowi temperatury ciała, nadmiar energii cieplnej musi zostać przekazany do otoczenia; w przeciwnym wypadku dochodzi do zaburzenia równowagi cieplnej i organizm zaczyna się przegrzewać. Wymiana energii cieplnej ze środowiskiem odbywa się poprzez przewodnictwo cieplne, konwekcję, promieniowanie oraz parowanie wody.

### Przewodnictwo cieplne

Przewodnictwo cieplne polega na przekazywaniu energii pomiędzy obszarami o różnych temperaturach, od obszaru o wyższej do obszaru o niższej temperaturze. Większość energii cieplnej produkowana jest w głębi ciała. Ponieważ temperatura skóry jest nieco niższa niż temperatura wnętrza ciała, ciepło transportowane jest w kierunku powierzchni. Okazuje się jednak, że tkanki ciała bardzo słabo przewodzą ciepło i większość transportu energii cieplnej ku powierzchni zachodzi dzięki przepływowi krwi. Energia cieplna przekazywana jest przez przewodnictwo cieplne z wnętrza komórek do naczyń krwionośnych i z krwią unoszona jest ku zewnętrznym partiom ciała. Utrata energii cieplnej przez skórę do otoczenia również odbywa się na zasadzie przewodnictwa. Ciepło przekazywane jest do warstwy powietrza bezpośrednio przylegającej do skóry, pod warunkiem, że temperatura powierzchni ciała jest wyższa niż temperatura otoczenia. Jednak ze względu na słabe przewodnictwo cieplne powietrza ilość traconej w ten sposób energii jest bardzo mała. Straty energii cieplnej przez przewodnictwo mogą wzrosnąć, jeśli dotykamy powierzchni dobrze przewodzącej ciepło, na przykład metalowego oparcia krzesła.

(Zob. także artykuł „O przewodnictwie cieplnym, ocieplaniu domów i o aerożelu”, *Neutrino* 5/2009).

### Konwekcja

Dzięki energii cieplnej przekazywanej na zewnątrz ciała, warstwa powietrza stykającego się ze skórą ogrzewa się. Ponieważ ciepłe powietrze ma mniejszą gęstość niż zimne, ogrzane powietrze unosi się ku górze, a jego miejsce zajmuje chłodniejsze powietrze z otoczenia. Podobnie dzieje się, kiedy przebywamy w wodzie. Podczas pływania ciepło przekazywane jest z ciała do warstwy wody bezpośrednio przylegającej do skóry. W analogiczny sposób ogrzana woda unosi się ku górze, a na jej miejsce napływa woda o niższej temperaturze. To zjawisko unoszenia ciepła za pośrednictwem poruszającej się substancji nosi nazwę **konwekcji**. Im większa jest różnica temperatur pomiędzy powierzchnią ciała a otoczeniem, tym szybciej następuje przekaz ciepła. Szybkość utraty ciepła przez konwekcję (zwana strumieniem cieplnym) wyraża się następującym wzorem

$$\Phi_k = \alpha \cdot S_k \cdot (T_s - T_o),$$

gdzie  $(T_s - T_o)$  oznacza różnicę temperatur pomiędzy skórą a otoczeniem,  $S_k$  odpowiada powierzchni ciała będącej w kontakcie z otoczeniem, a  $\alpha$  jest

współczynnikiem proporcjonalności, który zależy od właściwości otaczającej substancji (jej lepkości, gęstości oraz szybkości, z jaką się przemieszcza).

Powyższy wzór oznacza, że szybkość utraty energii cieplnej jest proporcjonalna do różnicy temperatur pomiędzy skórą a otoczeniem. Wynika z niego również, że utrata ciepła przez konwekcję możliwa jest jedynie wówczas, gdy temperatura otoczenia jest niższa niż temperatura skóry. W przeciwnym przypadku organizm pobiera energię cieplną z otoczenia i nagrzewa się.

Tempo oddawania ciepła zależy także od powierzchni styku ciała z otoczeniem. Całkowitą powierzchnię ludzkiego ciała można wyliczyć z następującego przybliżonego wzoru

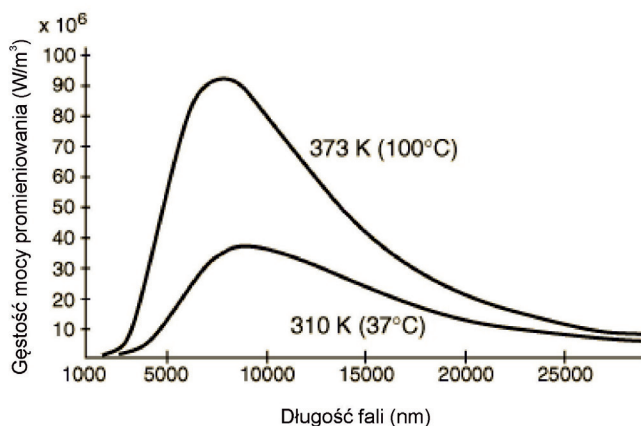
$$S = 0,202 \cdot M^{0,425} \cdot W^{0,725},$$

gdzie  $M$  oznacza masę ciała w kilogramach, a  $W$  – wzrost w metrach. Dla przykładu, całkowita powierzchnia ciała osoby o wadze 60 kg i wzroście 170 cm wynosi około 1,7 m<sup>2</sup>. Powierzchnia ciała wystawiona na bezpośredni przepływ powietrza  $S_k$ , występująca we wzorze na  $\Phi_k$ , jest oczywiście mniejsza niż powierzchnia całkowita  $S$ . Wartość tę można regulować ubierając się odpowiednio do temperatury powietrza. W lecie, kiedy zależy nam na zwiększeniu utraty ciepła, zakładamy przewiewne ubrania z krótkimi rękawami, co powoduje zwiększenie wartości  $S_k$ , a zimą nosimy ubrania z dobrze izolujących tkanin i okrywamy dodatkowo ręce i głowę, zmniejszając w ten sposób powierzchnię kontaktu z powietrzem. Powierzchnię styku możemy także zmniejszyć kuląc się lub kucając, dzięki czemu można dodatkowo zmniejszyć utratę ciepła.

Współczynnik  $\alpha$  występujący we wzorze na  $\Phi_k$  rośnie wraz z szybkością ruchu powietrza lub wody. Dlatego ciepło tracone jest szybciej w obecności wiatru lub podczas kąpieli w wartkim strumieniu.

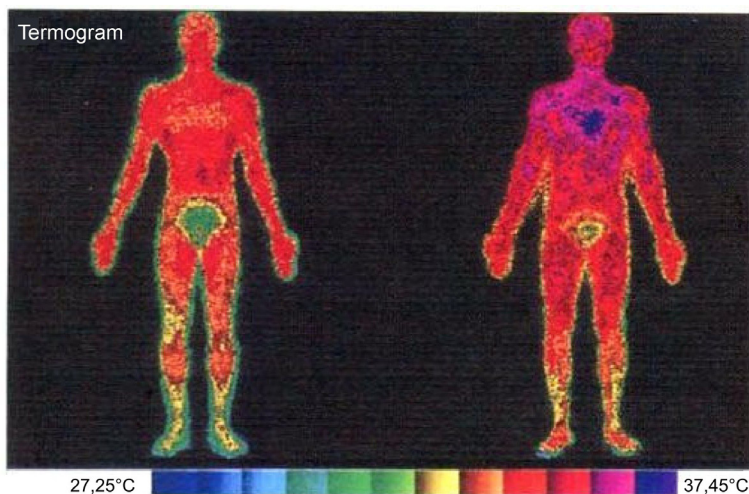
## Promieniowanie

Energia przekazywana jest również do otoczenia za pośrednictwem promieniowania elektromagnetycznego. Każdy przedmiot o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego (0 K = -273°C) emituje promieniowanie elektromagnetyczne. Zakres wysyłanego promieniowania zależy od temperatury obiektu.



Rys. 2. Porównanie widma promieniowania ciała stałego o temperaturze 37°C i 100°C. Ciało o temperaturze wyższej emituje więcej promieniowania o krótszych długościach fali

Ciało ludzkie promieniuje głównie w zakresie podczerwieni. Maksimum wysyłałego promieniowania odpowiada długości fali około 9000 nm czyli 9  $\mu\text{m}$ . Promieniowanie podczerwone jest niewidoczne dla ludzkich oczu, ale można je zarejestrować przy użyciu odpowiednich detektorów, zwanych kamerami podczerwieni. Pozwala to na wykonanie „zdzjęć” zwanych termogramami, na których różne kolory odpowiadają różnym temperaturom skóry.



Rys. 3. Termogramy przedniej i tylnej powierzchni ciała. Skala temperatur zawiera się w zakresie od 27,25°C do 37,45°, co odpowiada różnym kolorom na obrazie

Fizycy teoretycy wykazali, że tempo utraty ciepła przez promieniowanie jest proporcjonalne do różnicy czwartych potęg temperatury skóry i otoczenia. Szybkość oddawania energii cieplnej rośnie także wraz z powierzchnią ciała. Strumień ciepły promieniowania można zapisać następującym wzorem:

$$\Phi_r = A \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_s^4 - T_o^4)$$

gdzie  $T_s$  i  $T_o$  oznaczają temperaturę skóry i otoczenia mierzoną w kelwinach (K),  $S$  odpowiada powierzchni skóry,  $A$  oznacza zdolność absorpcyjną powierzchni, a  $\sigma$  to tzw. stała Stefana-Boltzmann.

Podobnie, jak w przypadku konwekcji, z powyższego wzoru wynika, że utrata ciepła przez promieniowanie możliwa jest tylko wówczas, jeśli temperatura ciała jest wyższa niż temperatura otoczenia. W przeciwnym przypadku organizm pobiera energię cieplną i ogrzewa się.

### Parowanie wody (pocenie się i oddychanie)

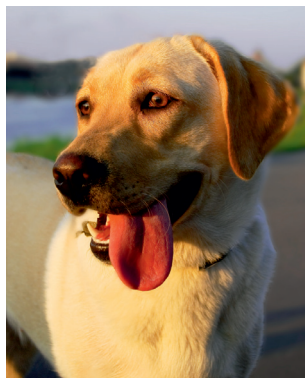
Duża część energii cieplnej tracona jest w procesie odparowywania potu z powierzchni skóry. Proces parowania pochłania bardzo dużo energii cieplnej, co pozwala na bardzo wydajne chłodzenie powierzchni skóry. Proces ten jest niezwykle ważny w przypadku, gdy temperatura otoczenia przewyższa temperaturę skóry i pozostałe sposoby oddawania ciepła zawodzą. Ilość wydzielanej z potem wody może wtedy wzrosnąć do 2 litrów na godzinę. Szybkość oddawania ciepła przez parowanie wody wyraża się wzorem

$$\Phi_p = k \cdot S \cdot (p_s - p_o),$$

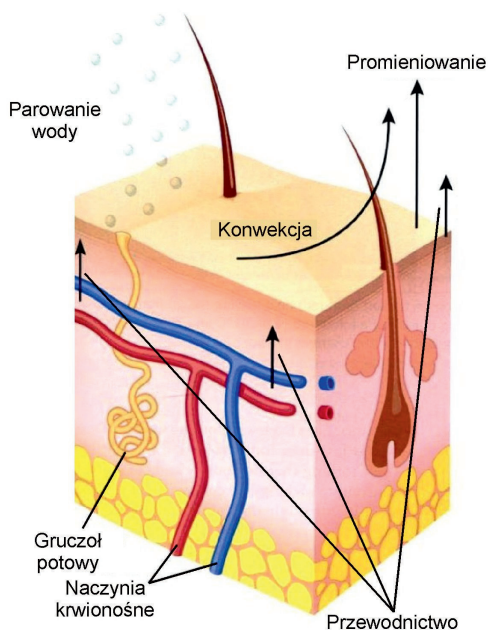
gdzie  $(p_s - p_o)$  oznacza różnicę ciśnienia cząstkowego pary wodnej przy powierzchni skóry i w otaczającym powietrzu,  $S$  odpowiada powierzchni skóry biorącej udział w parowaniu, a  $k$  jest współczynnikiem zależnym między innymi od ruchu powietrza.

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej jest związane z wilgotnością. Im większa wilgotność powietrza w danej temperaturze, tym większa wartość  $p_o$ , tym mniejsza różnica ciśnień cząstkowych  $(p_s - p_o)$  i tym wolniej traczone jest ciepło. Dlatego tak trudno jest znosić wysokie temperatury przy dużej wilgotności powietrza (na przykład w krajach tropikalnych). Utrata energii cieplnej przez parowanie zachodzi także w czasie oddychania. Parowanie zachodzi w tym wypadku na powierzchni wilgotnych dróg oddechowych, a energia cieplna unoszona jest z wydychanym powietrzem nasyconym parą wodną. Ten sposób oddawania ciepła jest szczególnie ważny w przypadku zwierząt, których skóra pokryta jest futrem, na przykład psów. W czasie upałów psy wystawiają język i wykonują szybkie płytkie oddechy, pozbywając się w ten sposób nadmiaru energii cieplnej.

Udział poszczególnych sposobów oddawania ciepła zależy od warunków otoczenia. Zgodnie z danymi otrzymanymi w kontrolowanym eksperymencie, obnażony człowiek w stanie spoczynku i w temperaturze 26°C traci 11% ciepła przez konwekcję, 67% ciepła przez promieniowanie i 22% ciepła przez parowanie wody. Straty ciepła przez przewodnictwo cieplne są bardzo niewielkie w porównaniu z pozostałymi sposobami. Proporcje te



Rys. 4. Chłodzenie przez oddychanie (fot. Olko)



silnie zależą od temperatury powietrza. Dla przykładu, w temperaturze 30°C energia cieplna tracona jest w 15% przez konwekcję, w 49% przez promieniowanie i w 36% przez parowanie wody.

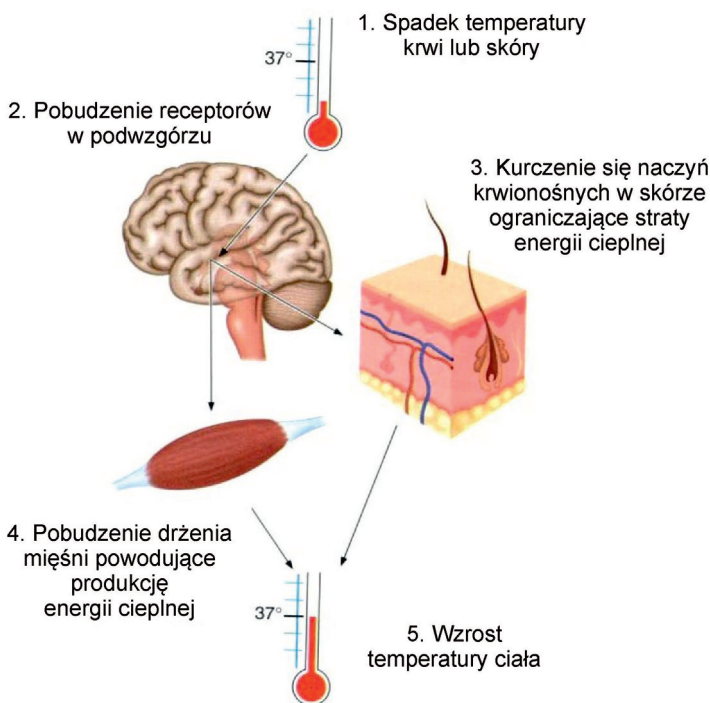
Rys. 5. Transport ciepła z wnętrza ciała do otoczenia. Energia cieplna wytwarzana w komórkach unoszona jest z krwią oraz w procesie przewodnictwa cieplnego w kierunku powierzchni ciała, a następnie do warstwy powietrza przylegającej do skóry. Z powierzchni ciała ciepło oddawane jest otoczeniu w procesie konwekcji, promieniowania i parowania wody



## Termoregulacja

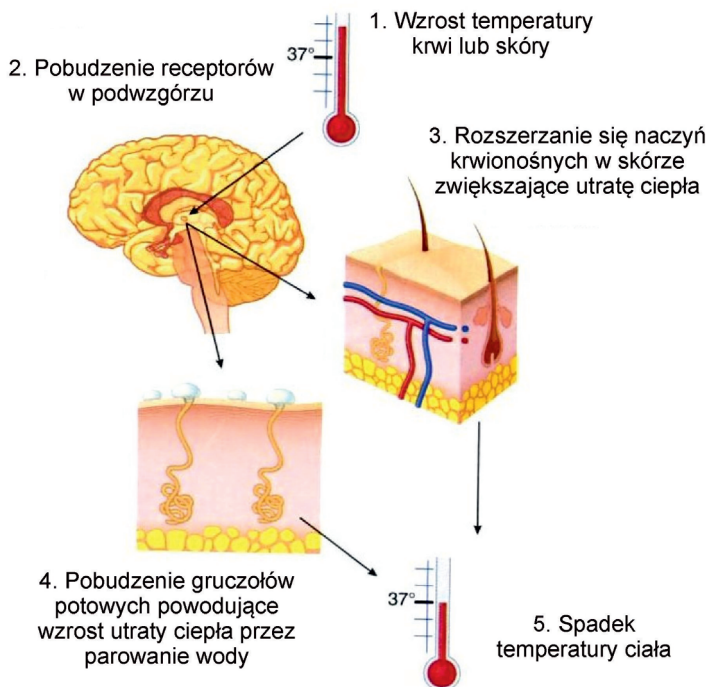
Ośrodek kontroli temperatury znajduje się w części mózgu zwanej podwzgórzem. Działa on na zasadzie termostatu, uruchamiającego mechanizmy zapobiegające nadmiernemu wychłodzeniu lub przegrzaniu organizmu. Znajdujące się w podwzgórzu receptory pozwalają określić temperaturę krwi przepływającej przez mózg. Jeśli temperatura odbiega od normy, podwzgórze odpowiednio reguluje tempo produkcji i oddawania ciepła do otoczenia.

Gdy temperatura spadnie poniżej optymalnej (hipotermia), następuje kurczenie się naczyń krwionośnych w skórze, co powoduje zmniejszenie przepływu krwi i tym samym zmniejszenie utraty ciepła przez powierzchnię ciała. Podwzgórze pobudza również ośrodek wyzwalający drżenie mięśni, dzięki czemu wytwarzane jest w mięśniach ciepło. Dodatkowo uruchamiane są mechanizmy zwiększające tempo metabolizmu komórek, co również prowadzi do zwiększenia produkcji energii cieplnej i podniesienia temperatury.



Rys. 6. Mechanizmy zapobiegające zbyt niemu wychłodzeniu organizmu (hipotermii)

Jeśli temperatura wzrośnie powyżej 37°C (hipertermia), naczynia krwionośne w skórze ulegają rozszerzeniu, zwiększając w ten sposób ilość oddawanego do otoczenia ciepła. Pobudzane są również gruczoły potowe, co pozwala na zwiększenie utraty ciepła przez parowanie. Przyspieszeniu ulega praca serca i pogłębia się także oddychanie. Dzięki temu przez płuca przepływa więcej krwi i z wydychanym powietrzem odprowadzane jest więcej ciepła.



Rys. 7. Mechanizmy zapobiegające nadmiernemu przegrzaniu organizmu (hipertermii)

Ośrodek kontroli temperatury otrzymuje również informacje z receptorów znajdujących się w skórze, co pozwala zareagować z pewnym wyprzedzeniem, zanim temperatura krwi przepływającej przez mózg ulegnie znacznemu obniżeniu lub podwyższeniu.

Ilustracje pochodzą z bloga: <http://completesoccertraining.blogspot.fr>